



# PEMANFAATAN TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA SEBAGAI INSTRUMEN KEUNGGULAN MILITER DALAM PEPERANGAN MODERN

(*THE USE OF WEATHER MODIFICATION TECHNOLOGY AS AN INSTRUMENT  
OF MILITARY SUPERIORITY IN MODERN WARFARE*)

<sup>1</sup>Roopal Jain, <sup>2</sup>Ir. R. Anugerah Purwoko Putro, <sup>3</sup>Elphis Rudy  
Prosi SPU,FSP, Unhan RI  
*darkrupal@gmail.com*

**Abstrak.** Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi pada abad ke-21 telah membawa perubahan signifikan dalam karakter peperangan modern. Salah satu perkembangan yang semakin mendapatkan perhatian dalam kajian strategis adalah Teknologi Modifikasi Cuaca (Weather Modification Technology/WMT). Pada awalnya teknologi ini dikembangkan untuk kepentingan sipil seperti peningkatan curah hujan, mitigasi kekeringan, dan pengendalian fenomena atmosfer. Namun, kemajuan dalam ilmu meteorologi dan rekayasa lingkungan membuka kemungkinan bahwa teknologi tersebut juga memiliki implikasi strategis dalam konteks militer. Dalam hal ini, WMT dapat dikategorikan sebagai teknologi penggunaan ganda (dual-use technology) yang memiliki manfaat sipil sekaligus potensi aplikasi militer. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca sebagai instrumen keunggulan militer dalam peperangan modern serta mengevaluasi keterkaitannya dengan kerangka hukum internasional yang mengatur modifikasi lingkungan. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif melalui studi literatur dan analisis normatif terhadap doktrin strategis, perkembangan teknologi atmosfer, serta instrumen hukum internasional seperti Konvensi ENMOD (1977) dan Protokol Tambahan I Konvensi Jenewa (1977). Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun penggunaan teknik modifikasi lingkungan untuk tujuan militer secara hukum dilarang, perkembangan teknologi atmosfer tetap memunculkan diskursus strategis mengenai potensi pemanfaatannya dalam operasi militer modern. Situasi ini menciptakan paradoks strategis-normatif antara potensi teknologi dan pembatasan hukum internasional. Penelitian ini mengusulkan Model Keseimbangan Ekostrategis sebagai kerangka konseptual yang mengintegrasikan kapabilitas teknologi, adaptasi strategis, akuntabilitas hukum, dan pengekangan moral guna menjaga stabilitas keamanan global.

**Kata kunci:** modifikasi cuaca, teknologi dual-use, ENMOD, hukum humaniter internasional, keamanan lingkungan, peperangan modern.



**Abstract.** *The advancement of science and technology in the twenty-first century has significantly transformed the character of modern warfare. One emerging area that has received increasing attention in strategic studies is Weather Modification Technology (WMT). Initially developed for civilian purposes such as rainfall enhancement, drought mitigation, control of atmospheric phenomena, advancements in meteorology and environmental engineering have opened the possibility that this technology may also have significant implications in military contexts. In this regard, WMT can be categorized as a dual-use technology that possesses both civilian benefits and potential military applications.*

*This study aims to analyze the potential utilization of Weather Modification Technology as an instrument of military superiority in modern warfare and to evaluate its relationship with the international legal framework governing environmental modification. The research employs a qualitative approach through literature review and normative analysis of strategic doctrines, developments in atmospheric technology, and relevant international legal instruments such as the ENMOD Convention (1977) and Additional Protocol I to the Geneva Conventions (1977). The findings indicate that although the use of environmental modification techniques for hostile military purposes is prohibited under international law, advancements in atmospheric technology continue to stimulate strategic discourse regarding their potential application in modern military operations. This situation creates a strategic–normative paradox between technological possibilities and international legal restrictions. This study proposes the Eco-Strategic Equilibrium Model as a conceptual framework integrating technological capability, strategic adaptation, legal accountability, and moral restraint to maintain global security stability.*

**Keywords:** *weather modification, dual-use technology, ENMOD Convention, international humanitarian law, environmental security, modern warfare.*

## 1. Pendahuluan

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi telah membawa perubahan besar dalam karakter peperangan modern. Sepanjang sejarah, inovasi teknologi selalu memengaruhi cara negara menjalankan strategi militer serta mempertahankan kepentingan nasionalnya. Mulai dari penemuan bubuk mesiu, perkembangan teknologi pesawat terbang, hingga kemunculan sistem senjata berbasis kecerdasan buatan, setiap kemajuan teknologi telah mengubah dinamika konflik dan memperluas spektrum kemampuan militer. Dalam konteks ini, teknologi tidak hanya menciptakan alat perang baru, tetapi juga membentuk paradigma strategis mengenai bagaimana perang direncanakan dan dilaksanakan.

Pada abad ke-21, kemajuan dalam bidang meteorologi, fisika atmosfer, serta pemodelan komputasi telah membuka kemungkinan baru dalam memahami dan memengaruhi proses atmosfer. Salah satu teknologi yang muncul dari perkembangan tersebut adalah Weather Modification Technology (WMT) atau teknologi modifikasi cuaca. Teknologi ini merujuk pada berbagai metode ilmiah yang digunakan untuk memanipulasi kondisi atmosfer guna menghasilkan perubahan cuaca tertentu, seperti meningkatkan curah hujan, mengurangi kabut, atau mengendalikan fenomena atmosfer lainnya. Secara umum, penelitian mengenai modifikasi cuaca pada awalnya dilakukan untuk tujuan sipil, khususnya dalam bidang pertanian, mitigasi bencana, dan pengelolaan sumber daya air.

Namun demikian, perkembangan teknologi modifikasi cuaca tidak hanya memiliki implikasi ilmiah dan lingkungan, tetapi juga berpotensi memiliki dimensi strategis dalam konteks keamanan dan pertahanan. Sejarah menunjukkan bahwa kondisi cuaca sering kali memainkan peran penting dalam menentukan keberhasilan atau kegagalan operasi militer. Banyak peristiwa dalam sejarah militer memperlihatkan bagaimana faktor alam seperti hujan, badai, kabut, dan suhu ekstrem dapat memengaruhi mobilitas pasukan, kemampuan pengintaian, serta efektivitas sistem persenjataan. Oleh karena itu, gagasan mengenai kemungkinan memanfaatkan teknologi untuk memengaruhi kondisi atmosfer telah lama menjadi perhatian dalam kajian strategis dan militer (Dharmadi,2025).

Salah satu contoh yang sering dibahas dalam literatur adalah penggunaan teknik penyemaian awan oleh Amerika Serikat selama Perang Vietnam melalui sebuah operasi rahasia yang dikenal sebagai Operation Popeye. Operasi tersebut dilakukan dengan tujuan memperpanjang musim hujan di wilayah Asia Tenggara sehingga jalur logistik lawan menjadi lebih sulit dilalui. Meskipun dampak operasional dari program tersebut masih diperdebatkan, pengungkapan operasi ini memicu

kekhawatiran global mengenai potensi penggunaan teknologi modifikasi lingkungan sebagai instrumen peperangan.

Sebagai respons terhadap kekhawatiran tersebut, masyarakat internasional mengembangkan kerangka hukum internasional yang bertujuan untuk membatasi penggunaan teknik modifikasi lingkungan dalam konflik bersenjata. Salah satu instrumen hukum yang penting dalam hal ini adalah ENMOD Convention, yang secara eksplisit melarang penggunaan teknik modifikasi lingkungan dengan dampak yang luas, tahan lama, atau parah sebagai sarana peperangan. Selain itu, perlindungan terhadap lingkungan dalam konflik bersenjata juga diperkuat melalui Additional Protocol I to the Geneva Conventions yang menegaskan bahwa metode atau sarana peperangan tidak boleh menyebabkan kerusakan yang meluas, jangka panjang, dan parah terhadap lingkungan alam.

Meskipun kerangka hukum internasional tersebut telah berlaku selama beberapa dekade, perkembangan teknologi atmosfer dalam beberapa tahun terakhir kembali memunculkan perdebatan mengenai relevansi dan kecukupan regulasi yang ada. Kemajuan dalam teknologi geoen지니어ing, pemodelan iklim, serta teknologi manipulasi aerosol atmosfer telah meningkatkan kemampuan manusia untuk memengaruhi sistem lingkungan dalam skala yang sebelumnya tidak terbayangkan. Dalam situasi ini, batas antara penelitian ilmiah yang sah untuk tujuan sipil dan potensi aplikasi strategis dalam konteks militer menjadi semakin kabur (Ningsih, 2024).

Selain itu, dalam doktrin militer kontemporer yang menekankan konsep operasi multi-domain, berbagai bentuk kemampuan non-kinetik mulai dipertimbangkan sebagai instrumen untuk memperoleh keunggulan strategis. Teknologi yang mampu memengaruhi kondisi lingkungan, termasuk atmosfer, dapat secara teoritis memengaruhi mobilitas militer, sistem pengintaian, serta efektivitas sensor dalam

operasi militer modern. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun penggunaan teknologi modifikasi cuaca untuk tujuan militer secara hukum dilarang, diskursus strategis mengenai potensi implikasinya tetap berkembang dalam studi pertahanan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana Teknologi Modifikasi Cuaca berkembang dari praktik ilmiah sipil menjadi teknologi dengan potensi implikasi strategis dalam peperangan modern. Selain itu, penelitian ini juga berupaya untuk mengevaluasi hubungan antara perkembangan teknologi tersebut dengan kerangka hukum internasional yang mengatur modifikasi lingkungan serta implikasinya terhadap stabilitas keamanan global.

## **2. Tinjauan Pustaka**

Kajian mengenai Teknologi Modifikasi Cuaca (Weather Modification Technology/WMT) berada pada persimpangan antara ilmu pengetahuan atmosfer, strategi militer, serta hukum internasional. Oleh karena itu, pembahasan literatur dalam penelitian ini tidak hanya mencakup aspek ilmiah mengenai modifikasi cuaca, tetapi juga teori-teori yang berkaitan dengan keamanan nasional, inovasi teknologi dalam militer, serta kerangka hukum yang mengatur penggunaan teknik modifikasi lingkungan.

### **a. Teori Keamanan Nasional.**

Konsep keamanan nasional merupakan salah satu kerangka teoritis utama dalam memahami dinamika pertahanan suatu negara. Menurut Alan Collins (2005), keamanan nasional merujuk pada kemampuan suatu negara untuk melindungi kedaulatan, integritas wilayah, serta kepentingan nasionalnya dari berbagai bentuk ancaman, baik yang bersifat militer maupun nonmiliter. Dalam konteks modern, ancaman terhadap keamanan nasional tidak lagi terbatas pada konflik bersenjata konvensional, tetapi juga mencakup

ancaman yang bersumber dari perkembangan teknologi, perubahan lingkungan, serta dinamika geopolitik global.

Perkembangan teknologi modern telah memperluas spektrum ancaman terhadap keamanan nasional. Negara-negara saat ini dihadapkan pada berbagai bentuk tantangan baru seperti serangan siber, perang informasi, serta penggunaan teknologi dual-use yang dapat dimanfaatkan baik untuk tujuan sipil maupun militer. Dalam konteks ini, teknologi modifikasi cuaca dapat dipandang sebagai salah satu teknologi yang memiliki potensi implikasi strategis terhadap keamanan nasional apabila digunakan secara tidak bertanggung jawab.

#### **b. Teori Determinisme Teknologi.**

Teori determinisme teknologi menyatakan bahwa perkembangan teknologi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perubahan sosial, politik, dan strategis dalam masyarakat. Smith (2014) menjelaskan bahwa inovasi teknologi sering kali menjadi faktor utama yang mendorong perubahan dalam struktur organisasi, termasuk institusi militer. Dalam konteks pertahanan, kemajuan teknologi tidak hanya menciptakan sistem senjata baru, tetapi juga mengubah cara negara merancang strategi militer dan mempertahankan kepentingannya nasionalnya.

Penerapan teori ini dalam konteks penelitian menunjukkan bahwa munculnya teknologi modifikasi cuaca berpotensi memengaruhi cara negara memandang lingkungan sebagai bagian dari domain strategis. Apabila teknologi tersebut berkembang secara signifikan, maka institusi militer dapat terdorong untuk mempertimbangkan kemungkinan pemanfaatannya dalam operasi militer, baik secara langsung maupun tidak langsung.

**c. Teori Revolusi dalam Urusan Militer.**

Konsep Revolusi dalam Urusan Militer (Revolution in Military Affairs/RMA) menjelaskan bagaimana inovasi teknologi dapat mengubah secara fundamental karakter peperangan. Para ahli strategi militer berpendapat bahwa kemajuan teknologi seperti sistem informasi, teknologi sensor, serta integrasi jaringan komunikasi telah menciptakan paradigma baru dalam peperangan modern. Dalam konteks ini, peperangan tidak lagi hanya bergantung pada kekuatan militer konvensional, tetapi juga pada kemampuan untuk mengintegrasikan teknologi canggih dalam operasi militer.

Teknologi modifikasi cuaca dapat dipandang sebagai bagian dari potensi transformasi tersebut. Meskipun saat ini teknologi tersebut lebih banyak digunakan untuk tujuan sipil, beberapa kajian strategis menunjukkan bahwa manipulasi kondisi atmosfer dapat memengaruhi berbagai aspek operasi militer, seperti visibilitas medan pertempuran, efektivitas sistem pengintaian, serta mobilitas pasukan.

**d. Kerangka Hukum Internasional tentang Modifikasi Lingkungan .**

Penggunaan teknik modifikasi lingkungan dalam konflik bersenjata telah diatur melalui berbagai instrumen hukum internasional. Salah satu instrumen yang paling penting adalah ENMOD Convention yang melarang penggunaan teknik modifikasi lingkungan untuk tujuan militer apabila menimbulkan dampak yang luas, tahan lama, atau parah. Konvensi ini merupakan respons terhadap kekhawatiran global mengenai potensi

penggunaan teknologi modifikasi lingkungan sebagai senjata dalam konflik internasional.

Selain itu, prinsip perlindungan lingkungan juga diperkuat dalam Additional Protocol I to the Geneva Conventions yang mengatur bahwa metode dan sarana peperangan tidak boleh menyebabkan kerusakan yang meluas, jangka panjang, dan parah terhadap lingkungan alam. Ketentuan ini mencerminkan komitmen masyarakat internasional untuk melindungi lingkungan sebagai bagian dari hukum humaniter internasional.

Namun demikian, beberapa penelitian menunjukkan bahwa kerangka hukum internasional yang ada masih memiliki keterbatasan dalam menghadapi perkembangan teknologi modern. Salah satu tantangan utama adalah tidak adanya mekanisme verifikasi yang kuat dalam Konvensi ENMOD, sehingga sulit untuk memastikan kepatuhan negara terhadap ketentuan yang telah disepakati.

#### **e. Studi Terdahulu tentang Teknologi Modifikasi Cuaca.**

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas aspek ilmiah dan kebijakan dari teknologi modifikasi cuaca. Beberapa studi menyoroti potensi manfaat teknologi ini dalam bidang pertanian, pengelolaan sumber daya air, serta mitigasi bencana. Namun, terdapat pula penelitian yang menyoroti potensi risiko strategis dari teknologi tersebut apabila digunakan dalam konteks militer.

Literatur strategis menunjukkan bahwa meskipun penggunaan modifikasi cuaca sebagai senjata secara hukum dilarang, perkembangan teknologi atmosfer tetap menjadi perhatian dalam diskursus keamanan global. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi modifikasi cuaca tidak hanya merupakan isu

ilmiah, tetapi juga memiliki implikasi penting dalam bidang strategi pertahanan dan tata kelola keamanan internasional.

### 3. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca (Weather Modification Technology/WMT) sebagai instrumen keunggulan militer dalam peperangan modern serta mengevaluasi keterkaitannya dengan kerangka hukum internasional yang mengatur penggunaan teknik modifikasi lingkungan. Mengingat topik penelitian ini berada pada persimpangan antara ilmu pengetahuan, strategi militer, serta hukum internasional, pendekatan penelitian yang digunakan adalah pendekatan kualitatif dengan metode analisis normatif dan studi literatur.

Pendekatan kualitatif dipilih karena penelitian ini berfokus pada pemahaman mendalam terhadap fenomena yang bersifat konseptual dan strategis. Berbeda dengan penelitian kuantitatif yang menekankan pengukuran statistik, pendekatan kualitatif memungkinkan peneliti untuk mengeksplorasi hubungan antara perkembangan teknologi, dinamika strategis, serta regulasi hukum internasional yang mengatur teknologi tersebut. Dengan pendekatan ini, penelitian dapat menggambarkan secara komprehensif bagaimana Teknologi Modifikasi Cuaca berkembang dalam wacana ilmiah dan strategis serta bagaimana teknologi tersebut dipahami dalam konteks keamanan global.

Metode utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur. Studi literatur dilakukan dengan mengkaji berbagai sumber akademik seperti buku, jurnal ilmiah, laporan penelitian, dokumen kebijakan pertahanan, serta publikasi organisasi internasional yang berkaitan dengan teknologi modifikasi cuaca dan keamanan lingkungan. Melalui studi literatur, peneliti dapat mengidentifikasi perkembangan penelitian sebelumnya, kerangka teoritis yang relevan, serta berbagai perspektif yang

telah dikemukakan oleh para ahli mengenai implikasi strategis teknologi modifikasi cuaca.

Selain itu, penelitian ini juga menggunakan pendekatan analisis normatif terhadap instrumen hukum internasional yang mengatur penggunaan teknik modifikasi lingkungan. Analisis normatif dilakukan dengan menelaah berbagai perjanjian internasional yang berkaitan dengan perlindungan lingkungan dalam konflik bersenjata, khususnya ENMOD Convention serta Additional Protocol I to the Geneva Conventions. Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana hukum internasional membatasi penggunaan teknologi modifikasi lingkungan serta untuk mengevaluasi sejauh mana kerangka hukum yang ada mampu menghadapi perkembangan teknologi modern.

Dalam proses pengumpulan data, peneliti menggunakan berbagai sumber informasi yang kredibel dan relevan dengan topik penelitian. Sumber-sumber tersebut meliputi artikel jurnal ilmiah internasional, laporan penelitian dari lembaga akademik dan organisasi internasional, dokumen kebijakan pertahanan dari berbagai negara, serta publikasi yang membahas perkembangan teknologi atmosfer dan geoengineering. Pemilihan sumber dilakukan secara selektif dengan mempertimbangkan tingkat kredibilitas, relevansi, serta kontribusi ilmiah dari masing-masing sumber.

Setelah data dikumpulkan, tahap selanjutnya adalah proses analisis data. Analisis data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap. Tahap pertama adalah proses reduksi data, yaitu proses seleksi dan penyaringan informasi yang relevan dengan fokus penelitian. Pada tahap ini, peneliti mengidentifikasi konsep-konsep utama yang berkaitan dengan teknologi modifikasi cuaca, strategi militer, serta hukum internasional.

Tahap kedua adalah proses kategorisasi data, yaitu pengelompokan informasi berdasarkan tema-tema tertentu. Dalam penelitian ini, data dikategorikan ke dalam beberapa tema utama seperti perkembangan teknologi modifikasi cuaca, implikasi

strategis teknologi tersebut dalam peperangan modern, serta kerangka hukum internasional yang mengatur penggunaan teknik modifikasi lingkungan. Pengelompokan ini bertujuan untuk memudahkan peneliti dalam memahami hubungan antara berbagai aspek yang diteliti.

Tahap terakhir adalah proses interpretasi data. Pada tahap ini, peneliti menganalisis hubungan antara perkembangan teknologi, dinamika strategis, serta regulasi hukum internasional untuk menghasilkan pemahaman yang komprehensif mengenai fenomena yang diteliti. Interpretasi data dilakukan dengan menggunakan kerangka teoritis yang telah dijelaskan dalam bagian tinjauan pustaka.

Melalui pendekatan metodologis tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan analisis yang sistematis dan mendalam mengenai Teknologi Modifikasi Cuaca sebagai fenomena yang memiliki implikasi penting dalam studi pertahanan, keamanan lingkungan, serta tata kelola global. Selain itu, metode penelitian yang digunakan juga memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi berbagai tantangan dan peluang yang muncul dari perkembangan teknologi tersebut dalam konteks keamanan internasional.

#### **4. Hasil dan Diskusi**

Penelitian ini bertujuan untuk memahami bagaimana perkembangan Teknologi Modifikasi Cuaca (Weather Modification Technology/WMT) memengaruhi dinamika keamanan global, khususnya dalam konteks peperangan modern. Analisis hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi ini tidak hanya memiliki dimensi ilmiah dan lingkungan, tetapi juga membawa implikasi strategis, hukum, dan etika yang kompleks. Oleh karena itu, bagian ini membahas beberapa aspek utama yang berkaitan dengan perkembangan teknologi modifikasi cuaca, pembatasan hukum internasional, serta implikasi strategisnya dalam konteks keamanan dan pertahanan.

#### a. Perkembangan Teknologi Modifikasi Cuaca

Teknologi modifikasi cuaca merupakan salah satu bidang penelitian dalam ilmu atmosfer yang berkembang pesat sejak pertengahan abad ke-20. Awalnya, penelitian dalam bidang ini bertujuan untuk memahami proses alami yang terjadi dalam pembentukan awan dan presipitasi. Para ilmuwan meteorologi berupaya mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi proses kondensasi uap air di atmosfer sehingga dapat meningkatkan peluang terjadinya hujan.

Eksperimen awal dalam modifikasi cuaca dilakukan melalui teknik penyemaian awan (cloud seeding), yaitu metode yang melibatkan penyebaran partikel tertentu ke dalam awan untuk merangsang pembentukan presipitasi. Partikel yang sering digunakan dalam proses ini antara lain perak iodida, natrium klorida, serta bahan kimia lainnya yang memiliki sifat higroskopis. Ketika partikel tersebut disebarkan ke dalam awan, partikel tersebut berfungsi sebagai inti kondensasi yang mempercepat pembentukan tetesan air atau kristal es.

Seiring dengan perkembangan teknologi, metode modifikasi cuaca tidak lagi terbatas pada teknik penyemaian awan. Kemajuan dalam bidang teknologi satelit, radar meteorologi, serta pemodelan komputer telah memungkinkan para ilmuwan untuk memahami dinamika atmosfer secara lebih komprehensif. Melalui teknologi pemodelan iklim berbasis komputer, para peneliti dapat memprediksi pola cuaca dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan sebelumnya.

Selain itu, perkembangan teknologi sensor dan sistem pengamatan atmosfer juga memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan efektivitas program modifikasi cuaca. Data yang diperoleh dari satelit meteorologi dan radar cuaca memungkinkan para ilmuwan untuk memantau kondisi atmosfer

secara real-time sehingga intervensi yang dilakukan dapat disesuaikan dengan kondisi atmosfer yang sedang terjadi.

Beberapa negara di dunia telah mengembangkan program modifikasi cuaca dalam skala nasional. Program-program tersebut umumnya bertujuan untuk:

- 1) Meningkatkan curah hujan di wilayah yang mengalami kekeringan .
- 2) Mengurangi risiko bencana alam seperti hujan es.
- 3) Mengendalikan kabut yang mengganggu transportasi udara.
- 4) Mendukung kegiatan pertanian dan pengelolaan sumber daya air.

Keberhasilan beberapa program modifikasi cuaca dalam konteks sipil menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki potensi manfaat yang signifikan bagi pembangunan ekonomi dan pengelolaan lingkungan. Namun demikian, perkembangan teknologi ini juga menimbulkan kekhawatiran mengenai kemungkinan penyalahgunaan teknologi tersebut dalam konteks militer.

#### **b. Teknologi Modifikasi Cuaca sebagai Teknologi Dual-Use**

Salah satu karakteristik utama dari teknologi modifikasi cuaca adalah sifatnya sebagai teknologi penggunaan ganda atau dual-use technology. Teknologi dual-use merujuk pada teknologi yang dapat digunakan untuk tujuan sipil sekaligus memiliki potensi aplikasi militer.

Dalam konteks teknologi modifikasi cuaca, manfaat sipil dari teknologi ini sangat jelas. Program modifikasi cuaca dapat membantu negara dalam mengatasi berbagai masalah lingkungan seperti kekeringan, kekurangan air, serta gangguan cuaca yang memengaruhi aktivitas ekonomi. Teknologi ini juga dapat dimanfaatkan dalam upaya mitigasi bencana alam serta peningkatan ketahanan pangan.

Namun demikian, kemampuan untuk memengaruhi kondisi atmosfer juga dapat memiliki implikasi strategis dalam konteks militer. Beberapa kajian strategis menunjukkan bahwa manipulasi kondisi cuaca secara teoritis dapat memengaruhi berbagai aspek operasi militer.

Beberapa potensi implikasi strategis dari teknologi modifikasi cuaca antara lain:

**1) Pengaruh terhadap mobilitas militer**

Kondisi cuaca memiliki pengaruh besar terhadap mobilitas pasukan dan kendaraan militer. Hujan lebat dapat membuat medan operasi menjadi sulit dilalui, sedangkan kabut dapat mengurangi visibilitas di medan perang.

**2) Pengaruh terhadap sistem pengintaian dan sensor**

Sistem pengintaian modern banyak bergantung pada teknologi sensor optik, radar, dan inframerah. Perubahan kondisi atmosfer dapat memengaruhi kemampuan sistem tersebut dalam mendeteksi objek di medan operasi.

**3) Pengaruh terhadap operasi udara**

Operasi militer yang melibatkan pesawat terbang sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Kabut tebal atau badai dapat menghambat operasi udara serta memengaruhi keselamatan penerbangan militer.

**4) Pengaruh terhadap logistik militer**

Cuaca juga dapat memengaruhi jalur logistik dan distribusi pasokan militer. Kondisi cuaca ekstrem dapat mengganggu transportasi darat maupun udara.

Dengan mempertimbangkan berbagai faktor tersebut, tidak mengherankan apabila teknologi modifikasi cuaca menjadi perhatian dalam diskursus strategis mengenai peperangan modern.

### c. Pembatasan Hukum Internasional terhadap Modifikasi Lingkungan

Meskipun teknologi modifikasi cuaca memiliki potensi implikasi strategis, penggunaan teknologi ini untuk tujuan militer secara eksplisit dibatasi oleh hukum internasional. Salah satu instrumen hukum internasional yang paling penting dalam hal ini adalah ENMOD Convention.

Konvensi ini melarang penggunaan teknik modifikasi lingkungan sebagai sarana peperangan apabila teknik tersebut menimbulkan dampak yang:

- 1) luas
- 2) tahan lama
- 3) parah

Tujuan utama dari konvensi ini adalah untuk mencegah penggunaan lingkungan sebagai senjata dalam konflik bersenjata. Konvensi ini juga mencerminkan kesadaran global bahwa eksploitasi lingkungan dalam konflik bersenjata dapat menimbulkan dampak yang sangat merusak terhadap ekosistem serta kehidupan manusia.

Selain Konvensi ENMOD, perlindungan terhadap lingkungan dalam konflik bersenjata juga diatur dalam Additional Protocol I to the Geneva Conventions. Protokol ini mengatur bahwa metode atau sarana peperangan tidak boleh menyebabkan kerusakan lingkungan yang meluas, jangka panjang, dan parah.

Ketentuan tersebut menunjukkan bahwa masyarakat internasional berupaya memastikan bahwa konflik bersenjata tidak menyebabkan kerusakan lingkungan yang tidak dapat diperbaiki.

#### **d. Kelemahan Rezim Hukum Internasional**

Meskipun kerangka hukum internasional telah mengatur penggunaan teknik modifikasi lingkungan, beberapa penelitian menunjukkan bahwa rezim hukum yang ada masih memiliki beberapa kelemahan.

Beberapa kelemahan utama dari rezim hukum internasional ini antara lain:

##### **1) Tidak adanya mekanisme verifikasi**

Konvensi ENMOD tidak memiliki sistem inspeksi internasional yang memungkinkan verifikasi terhadap kepatuhan negara.

##### **2) Ambiguitas definisi**

Istilah seperti “luas”, “tahan lama”, dan “parah” dapat memiliki interpretasi yang berbeda antarnegara.

##### **3) Kesulitan atribusi**

Dalam kasus manipulasi atmosfer, sangat sulit untuk menentukan secara pasti pihak yang bertanggung jawab terhadap perubahan cuaca tertentu.

##### **4) Perkembangan teknologi yang lebih cepat daripada regulasi**

Kemajuan teknologi atmosfer dan geoengineering berkembang lebih cepat dibandingkan dengan perkembangan hukum internasional.

Kondisi ini menciptakan tantangan baru dalam tata kelola global terhadap teknologi modifikasi lingkungan.

#### **e. Paradoks Strategis–Normatif**

Perkembangan teknologi modifikasi cuaca menciptakan kondisi yang dapat disebut sebagai paradoks strategis–normatif. Paradoks ini muncul karena adanya ketegangan antara kepentingan strategis negara dan pembatasan hukum internasional.

Di satu sisi, negara memiliki insentif untuk mengeksplorasi berbagai inovasi teknologi yang dapat meningkatkan keunggulan militer. Dalam konteks peperangan modern, kemampuan non-kinetik semakin dipandang sebagai instrumen penting dalam mencapai keunggulan strategis.

Di sisi lain, hukum internasional dan prinsip etika kemanusiaan menuntut adanya pembatasan terhadap penggunaan teknologi yang dapat merusak lingkungan atau menimbulkan penderitaan manusia.

Paradoks ini mencerminkan dilema klasik dalam hubungan antara teknologi dan hukum internasional. Kemajuan teknologi sering kali menciptakan kemampuan baru yang belum sepenuhnya diatur oleh kerangka hukum yang ada.

#### **f. Implikasi Strategis dalam Operasi Multi-Domain**

Dalam doktrin militer kontemporer, konsep operasi multi-domain semakin mendapatkan perhatian. Konsep ini menekankan pentingnya integrasi berbagai domain operasi seperti:

- 1) darat
- 2) laut
- 3) udara
- 4) siber
- 5) ruang angkasa

Beberapa analis strategis berpendapat bahwa lingkungan alam juga dapat dipandang sebagai variabel strategis dalam operasi militer modern. Kondisi

atmosfer dapat memengaruhi berbagai aspek operasi militer seperti sistem komunikasi, sensor, serta mobilitas pasukan.

Dalam konteks ini, teknologi yang mampu memengaruhi kondisi atmosfer dapat memiliki implikasi strategis yang signifikan. Namun demikian, penting untuk diingat bahwa sistem atmosfer merupakan sistem yang sangat kompleks dan sulit diprediksi secara sempurna.

Intervensi terhadap sistem atmosfer dapat menimbulkan dampak yang tidak terduga dan berpotensi memengaruhi wilayah yang luas. Oleh karena itu, pemanfaatan teknologi modifikasi cuaca dalam konteks militer menghadapi berbagai tantangan teknis dan etika.

#### **g. Implikasi bagi Stabilitas Keamanan Global**

Perkembangan teknologi modifikasi cuaca menunjukkan pentingnya tata kelola global yang efektif dalam mengatur penggunaan teknologi lingkungan. Tanpa adanya mekanisme regulasi yang kuat, perkembangan teknologi ini dapat menimbulkan ketidakpercayaan antarnegara.

Beberapa implikasi yang dapat muncul antara lain:

- 1) Meningkatnya kecurigaan antarnegara mengenai manipulasi cuaca.
- 2) Potensi konflik diplomatik terkait perubahan lingkungan.
- 3) Kesulitan dalam atribusi terhadap fenomena cuaca ekstrem.

Oleh karena itu, masyarakat internasional perlu memperkuat kerja sama global dalam mengatur penggunaan teknologi modifikasi lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan untuk mencegah penyalahgunaan teknologi sebagai instrumen peperangan, tetapi juga untuk memastikan bahwa perkembangan ilmu pengetahuan dapat dimanfaatkan secara bertanggung jawab.



Melalui tata kelola global yang kuat, teknologi modifikasi cuaca dapat tetap memberikan manfaat bagi masyarakat tanpa menimbulkan risiko terhadap stabilitas keamanan internasional dan keberlanjutan lingkungan global.

## 5. Kesimpulan

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi pada abad ke-21 telah membawa perubahan signifikan dalam karakter peperangan modern. Teknologi tidak lagi hanya berfungsi sebagai alat pendukung dalam operasi militer, tetapi juga membentuk paradigma baru dalam strategi pertahanan dan keamanan global. Dalam konteks ini, Teknologi Modifikasi Cuaca (Weather Modification Technology/WMT) muncul sebagai salah satu inovasi ilmiah yang memiliki implikasi strategis yang kompleks karena sifatnya sebagai teknologi penggunaan ganda (dual-use technology).

Penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi modifikasi cuaca pada awalnya dikembangkan untuk tujuan sipil seperti peningkatan curah hujan, mitigasi kekeringan, pengendalian kabut, serta pengelolaan sumber daya air. Berbagai negara telah mengembangkan program modifikasi cuaca untuk mendukung sektor pertanian, meningkatkan ketahanan pangan, serta mengurangi dampak bencana alam. Perkembangan teknologi satelit, radar meteorologi, dan pemodelan atmosfer berbasis komputer juga telah meningkatkan kemampuan manusia dalam memahami dinamika atmosfer serta memprediksi pola cuaca secara lebih akurat.

Namun demikian, penelitian ini juga menunjukkan bahwa teknologi modifikasi cuaca memiliki potensi implikasi strategis dalam konteks keamanan dan pertahanan. Kondisi cuaca merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi keberhasilan operasi militer. Faktor-faktor seperti hujan, kabut, badai, dan suhu ekstrem dapat memengaruhi mobilitas pasukan, efektivitas sistem pengintaian, serta kinerja sistem persenjataan modern. Oleh karena itu, kemampuan untuk memengaruhi kondisi

atmosfer secara teoritis dapat memberikan keuntungan operasional dalam konflik bersenjata.

Meskipun demikian, penggunaan teknologi modifikasi cuaca sebagai sarana peperangan secara eksplisit dibatasi oleh hukum internasional. Instrumen hukum seperti ENMOD Convention melarang penggunaan teknik modifikasi lingkungan yang menimbulkan dampak luas, tahan lama, atau parah terhadap lingkungan. Selain itu, prinsip perlindungan lingkungan dalam konflik bersenjata juga ditegaskan dalam Additional Protocol I to the Geneva Conventions yang menekankan bahwa metode atau sarana peperangan tidak boleh menyebabkan kerusakan lingkungan yang meluas, jangka panjang, dan parah.

Penelitian ini menemukan adanya paradoks strategis–normatif dalam perkembangan teknologi modifikasi cuaca. Di satu sisi, perkembangan teknologi mendorong negara untuk mengeksplorasi berbagai inovasi yang dapat meningkatkan keunggulan strategis dalam peperangan modern. Dalam doktrin militer kontemporer, khususnya konsep operasi multi-domain, kemampuan non-kinetik semakin dipandang sebagai instrumen penting dalam mencapai keunggulan operasional. Dalam konteks ini, manipulasi kondisi atmosfer dapat secara teoritis memengaruhi mobilitas militer, sistem sensor, serta kemampuan pengintaian di medan operasi.

Di sisi lain, hukum internasional dan prinsip etika kemanusiaan menuntut adanya pembatasan yang ketat terhadap penggunaan teknologi yang dapat merusak lingkungan atau menimbulkan dampak kemanusiaan yang luas. Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan bahwa rezim hukum internasional yang mengatur modifikasi lingkungan masih memiliki beberapa kelemahan, seperti tidak adanya mekanisme verifikasi yang kuat, ambiguitas definisi mengenai dampak lingkungan, serta kesulitan dalam menentukan atribusi terhadap perubahan kondisi atmosfer.

Dalam konteks ini, penelitian ini menekankan pentingnya penguatan tata kelola global terhadap teknologi modifikasi lingkungan. Komunitas internasional perlu



mengembangkan mekanisme kerja sama yang lebih efektif untuk memastikan bahwa teknologi modifikasi cuaca digunakan secara bertanggung jawab dan tidak disalahgunakan sebagai instrumen peperangan. Penguatan transparansi, kerja sama ilmiah internasional, serta pengembangan mekanisme verifikasi dapat menjadi langkah penting dalam meningkatkan kepercayaan antarnegara.

Sebagai kontribusi konseptual, penelitian ini juga mengusulkan pendekatan yang disebut sebagai Model Keseimbangan Ekostrategis (Eco-Strategic Equilibrium Model). Model ini menekankan pentingnya keseimbangan antara empat elemen utama, yaitu kapabilitas teknologi, adaptasi strategis, akuntabilitas hukum, dan pengekanan moral. Keempat elemen tersebut perlu berjalan secara seimbang agar perkembangan teknologi dapat dimanfaatkan secara konstruktif tanpa menimbulkan ancaman terhadap stabilitas keamanan global.

Pada akhirnya, penelitian ini menyimpulkan bahwa kedewasaan strategis suatu negara tidak diukur dari kemampuannya untuk mengendalikan alam sebagai instrumen peperangan, tetapi dari kemampuannya untuk menahan diri dalam pemanfaatan teknologi yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kemanusiaan. Dengan demikian, pengembangan teknologi modifikasi cuaca perlu diiringi dengan komitmen kuat dari masyarakat internasional untuk menjaga stabilitas keamanan global serta melindungi keberlanjutan lingkungan bagi generasi mendatang.



## Daftar Pustaka

### 1. Buku

- Collins, A. (2005). *Contemporary Security Studies*. Oxford: Oxford University Press.
- Fleming, J. R. (2010). *Fixing the Sky: The Checkered History of Weather and Climate Control*. New York: Columbia University Press.
- Freedman, L. (2017). *The Future of War: A History*. New York: PublicAffairs.
- Brimblecombe, P. (2018). *Air Pollution and Environmental Change: A Historical Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.

### 2. Jurnal

- Baum, S. D., & Hester, D. M. (2019). Governing geoengineering research: A political and ethical perspective. *Environmental Politics*, 28(3), 495–514.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/09644016.2018.1446530>
- Bruintjes, R. T. (2016). A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(3), 425–445.  
DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00276.1>
- Dharmadi, I. W. A., Halkis, M., Santoso, B., & Almubaroq, H. Z. (2025). *The strategy for aircrew development in Maintenance Squadron No. 022 to support the implementation of maintenance and air operations of the Indonesian Air Force*. **Formosa Journal of Applied Sciences**, 4(7), 2069–2080. <https://doi.org/10.55927/fjas.v4i7.236>
- Keith, D. W., & Irvine, P. (2016). Solar geoengineering and climate governance. *Nature Climate Change*, 6(6), 1–6.  
DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2966>



Ningsih, D. A. N., Halkis, M., & Susanto, R. (2024). Pertimbangan etika dalam pengembangan teknologi militer: Tinjauan filsafat ilmu pertahanan. *Jurnal Kewarganegaraan*, 8(1).

Parson, E. A., & Erickson, J. D. (2017). Climate engineering in global climate governance. *Global Environmental Politics*, 17(4), 1–9.  
DOI: [https://doi.org/10.1162/GLEP\\_a\\_00430](https://doi.org/10.1162/GLEP_a_00430)

Reeves, J., & Voas, J. (2017). Owing the weather: Strategic implications of weather modification. *Military Review*, 97(2), 60–69.  
DOI: <https://doi.org/10.55540/0031-1723.2950>

### 3. Sumber Dokumen

International Committee of the Red Cross (ICRC). (1977). *Additional Protocol I to the Geneva Conventions of 12 August 1949*. Geneva: International Committee of the Red Cross.

United Nations. (1977). *Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques (ENMOD)*. New York: United Nations.

World Meteorological Organization (WMO). (2018). *Guide to Weather Modification Research*. Geneva: World Meteorological Organization.